



Aplicación del método electromagnético de inducción ligera para el análisis de la permeabilidad en medios fracturados (granito de "El Berrocal", Sistema Central Español)

Application of the low-induction electromagnetic method for the permeability analysis in fractured rocks («El Berrocal» granite, Spanish Central System)

Raquel De Vicente ^(1,2), Alfonso Muñoz-Martín ⁽²⁾, Antonio Olaiz ⁽²⁾, Loreto Antón ⁽²⁾ y Gerardo de Vicente ⁽²⁾

⁽¹⁾ Instituto de Ciencias de la Tierra Jaime Almera-CSIC, Barcelona.

⁽²⁾ Grupo de Tectonofísica Aplicada. Departamento Geodinámica, Universidad Complutense. 28040 Madrid. rdevicente@ija.csic.es; amunoz@geo.ucm.es

ABSTRACT

Fracture characterization in granites has been an important subject of study during these last years, by means of geological-structural cartography, hydrogeology and geochemical analysis. These works have been carried out to investigate the hydromechanics and permeability in low-permeability rocks. In this study we apply a surface geophysical method in order to characterize the permeability of the fault zones affecting «El Berrocal» granite (Central System, Spain). The low-induction electromagnetic method (EM) gives us the apparent resistivity (ρ_a) values of the rocks at a maximum depth. As the ρ_a depends on the granite alteration and/or the water content, this parameter allows estimating the relative permeability of different fracture zones. The obtained results show that the high-permeability fractures are those that are larger ones which were active during Alpine deformation (Eocene-present).

Key words: Permeability, low-induction electromagnetic method, resistivity, fractures, Spanish Central System

Geogaceta, 46 (2009), 39-42
ISSN: 0213683X

Introducción

Los macizos graníticos suelen presentar una permeabilidad baja y heterogénea, siendo las fracturas las principales vías de flujo. La caracterización hidrogeológica de éstas se realiza mediante modelos discretos de fracturas, para los cuales es necesario caracterizar geométricamente la red de fracturación, y asignar valores de permeabilidad. El objetivo de este trabajo es la detección y cartografía de fracturas conductoras en superficie, y la estimación de su permeabilidad relativa mediante la aplicación del método EM de inducción ligera. La zona de estudio ha sido el granito de «El Berrocal», debido a que existen numerosos trabajos previos, y es posible calibrar los resultados con información geológico-estructural, hidrogeológica y geoquímica (Campos *et al.*, 1996; Hidrobap Project, 1999; Pérez-López *et al.*, 2005; Elorza Tenreiro, F.J. (2002); Pajares Giménez, G., 2005).

Marco geológico

El granito de «El Berrocal» se encuentra en la provincia de Toledo,

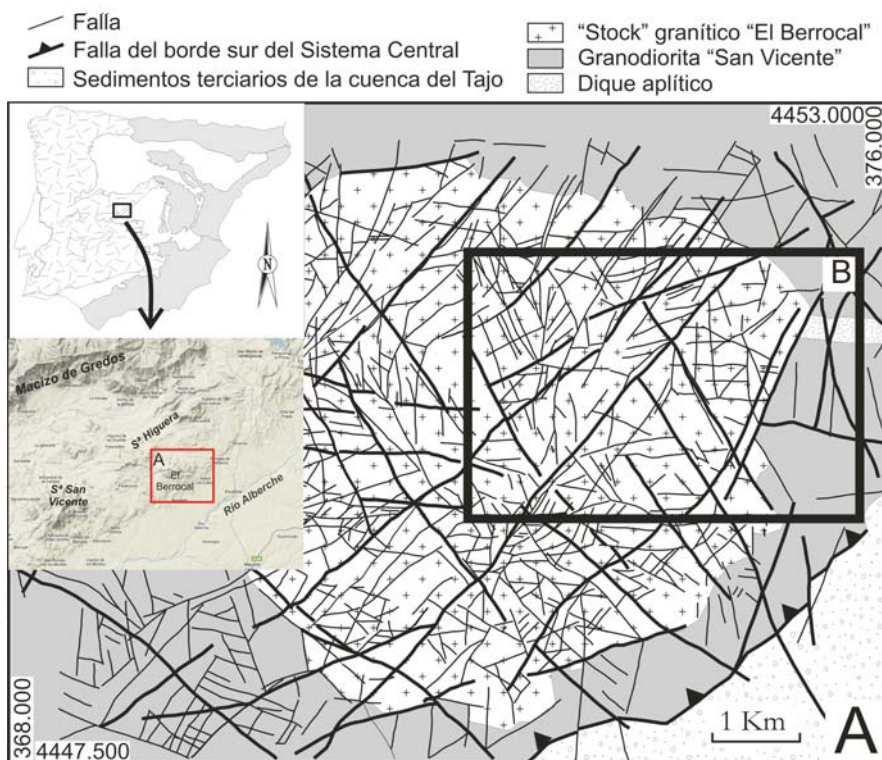
cerca del término municipal de Escalona. Fisiográficamente forma parte del Sistema Central Español, estando limitado al Norte por el Macizo de Gredos, al Suroeste por la Sierra de San Vicente y al Sur por el río Alberche (Fig. 1). Geológicamente está situado en las proximidades del borde sur del Sistema Central, el cual cabalga a los sedimentos terciarios de la Cuenca de Madrid (Fig. 1).

El macizo granítico se encuentra fuertemente fracturado (Fig. 1), y la cartografía estructural (Hidrobap Project, 1999) muestra que existen cuatro familias principales de fallas, con direcciones NNE-SSW, NE-SW, E-W y NW-SE. Éstas han sido interpretadas como generadas en dos eventos tectónicos principales (Pérez-López *et al.*, 2005): 1) Campo de paleoesfuerzos extensional N-S, datado con una edad Permo-Triásica (240 ± 10 M.a.), con S_{HMAX} según N100°E; 2) campo de paleoesfuerzos Alpino (Eoceno - Actualidad?) con S_{HMAX} entre N150° y N10°E.

Metodología

El principio del método EM se basa en la respuesta del terreno al paso de

las ondas EM. Por medio de una corriente alterna en una bobina transmisora (Tx) se crea un campo magnético primario (H_p) ortogonal que se propaga por el aire y por el terreno (e.g. McNeill, J.D., 1980). Si en el terreno existe un conductor, se genera un campo magnético secundario (H_s). Una bobina receptora (Rx) recibe tanto H_p como H_s , y a bajos números de inducción (frecuencias < 50 kHz), la razón entre estos campos es proporcional a la conductividad del terreno (Sharma, 1997). Durante este estudio se ha trabajado con el método EM de inducción ligera CM-031, que está compuesto por dos bobinas (Tx y Rx) montadas en una barra rígida, espaciadas entre sí 3.74 m y con una frecuencia de 9.8 kHz. La toma de datos se lleva a cabo sosteniendo el equipo durante unos segundos en cada punto sin contacto directo con el suelo. En función de la orientación de las bobinas es posible obtener diferentes penetraciones (6 m si el dipolo está vertical y 3 m si está horizontal). Al profundizar hasta 6 m la distorsión en los valores obtenidos es mucho menor debido al menor efecto del suelo edáfico y la topografía. Para evitar esta distorsión, así como la



presencia de anisotropías se han realizado dos medidas por punto a 90°, utilizando el valor medio para la realización de los mapas.

El método proporciona dos medidas, una de ρ_a (Ohm·m) y otra de com-

ponente en fase (en partes por mil) de H_p respecto a H_s . Este último parámetro sirve como control de calidad de las medidas (a mayor estabilidad de componente en fase, menor ruido en la señal).

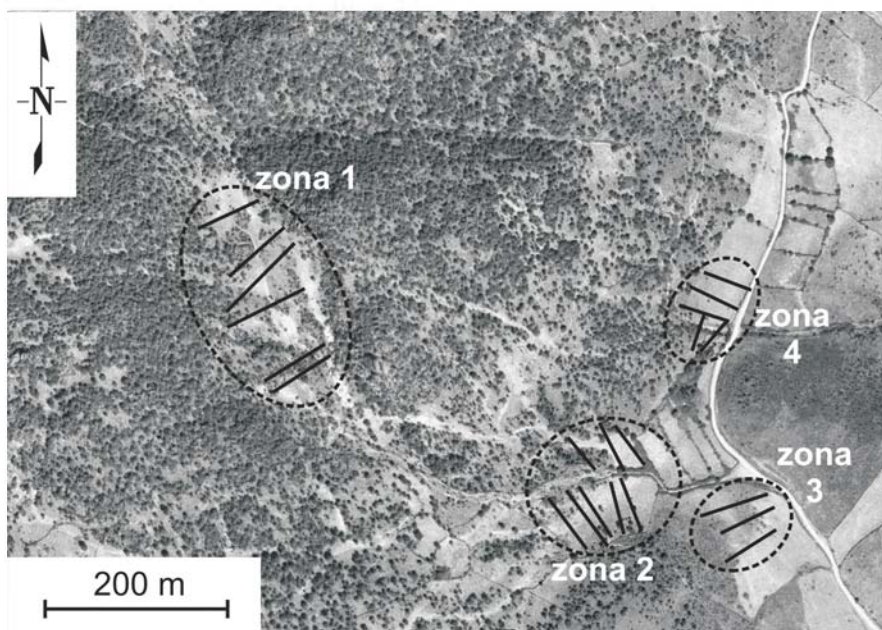


Fig. 2.- Situación de los perfiles EM y señalización de las cuatro zonas de estudio en campo.

Fig. 2.- Location of the EM profiles. The four fieldwork zones are signalled too.

Trabajos realizados

Los perfiles EM se han realizado sobre las zonas principales de fractura cartografiadas en trabajos previos (Hidrobap Project, 1999). Se han realizado un total de 22 perfiles EM, agrupados en 4 zonas (Fig. 2). El espaciado de la toma de datos es de 5 m. La localización y georeferenciación de los datos se realizó con GPS y altímetro barométrico. Una vez realizado el levantamiento EM se han calibrado los datos de ρ_a con el de componente en fase, eliminando los valores menos estables (< 2%). Posteriormente se han realizado los mapas de resistividad aparente a ambas profundidades.

Resultados

Los resultados que presentamos son los mapas de ρ_a a 3 y 6 m de profundidad para toda la zona, obtenidos tras integrar en un único mapa las 4 mallas locales. El primer hecho a destacar es la buena correlación entre el mapa a 3m con el de 6 m (Fig. 3) de profundidad de alcance. Para la discusión de las permeabilidades relativas utilizaremos el mapa a 6 m de profundidad. El más superficial permite controlar la presencia del suelo y/o zona de alteración. En estos mapas, y dada la homogeneidad litológica en el área, los valores ρ_a bajos se interpretan como una mayor alteración y/o presencia de agua.

Las zonas de fractura quedan caracterizadas por ser bandas de baja ρ_a (<60 Ohm·m para el mapa a 6 m de profundidad) frente a los bloques de granito y/o granodiorita menos fracturados (> 70 Ohm·m). La disminución de ρ_a que aparece en los límites entre las cuatro zonas analizadas se debe a la ausencia de datos y al efecto de la interpolación. A continuación se describen brevemente las principales características de cada zona (Figs. 2, 3):

Zona 1: Se sitúa a lo largo de una zona de fractura NNO-SSE. Los valores de ρ_a obtenidos son intermedios (entre 50 – 75 Ohm·m), lo cual implica que es una zona de fractura poco permeable o un menor grado de intensidad de fracturación. En el mapa local realizado se puede observar que presentan una forma anastomosada típica de fallas de desgarre.

Zona 2: Se sitúa a lo largo de una zona de fractura orientada E-O, y en ella se pueden diferenciar dos

fracturas de dirección y resistividad diferente. La situada más al Norte (sobre la que se han realizado 3 perfiles EM) presenta unos valores de ρ_a altos ($> 70 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$), lo cual implica que es una fractura muy poco conductora. La falla situada más al Sur lleva una dirección NE-SO, y presenta valores de ρ_a bajos (entre 40 y 55 $\text{Ohm}\cdot\text{m}$), por lo que la interpretamos como más permeable que la E-O. En el mapa local se ha podido observar que la falla NE-SO presenta una geometría escalonada, y además, el mínimo topográfico no coincide con el mínimo resistivo, lo cual implica que la traza de la falla no va por el fondo del valle, sino a media ladera.

Zona 3: Se dispone a lo largo de una fractura NO-SE, y presenta unos valores de ρ_a intermedios (55 – 70 $\text{Ohm}\cdot\text{m}$). La peculiaridad que presenta esta zona de falla es que el mínimo que la caracteriza se interrumpe hacia el SE, donde aparece una franja de alta conductividad perpendicular a ella. Esta franja podría corresponder a otra falla que se dispone de manera ortogonal, y que no había sido cartografiada previamente debido a la menor calidad de los afloramientos cuando las fracturas afectan a la granodiorita.

Zona 4: Se sitúa a lo largo de una importante zona de fractura NNE-SSO, que pone en contacto el granito facies «El Berrocal» con la granodiorita y el dique aplítico atravesado por aquel (Fig. 1). Esta fractura es la que presenta los menores valores de ρ_a de la región estudiada ($< 45 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$), por lo que la interpretamos como la zona de fractura más permeable. Se caracteriza por estar constituida por una importante zona de fractura principal de más de 20 m de anchura. Estos datos sugieren una componente menos direccional y más extensional, lo que está de acuerdo con datos cinemáticas y dinámicos previos (Pérez-López *et al.*, 2005).

Conclusiones

Desde el punto de vista metodológico el método EM de inducción ligera presenta una gran eficacia para cartografiar zonas de fractura conductoras en granito.

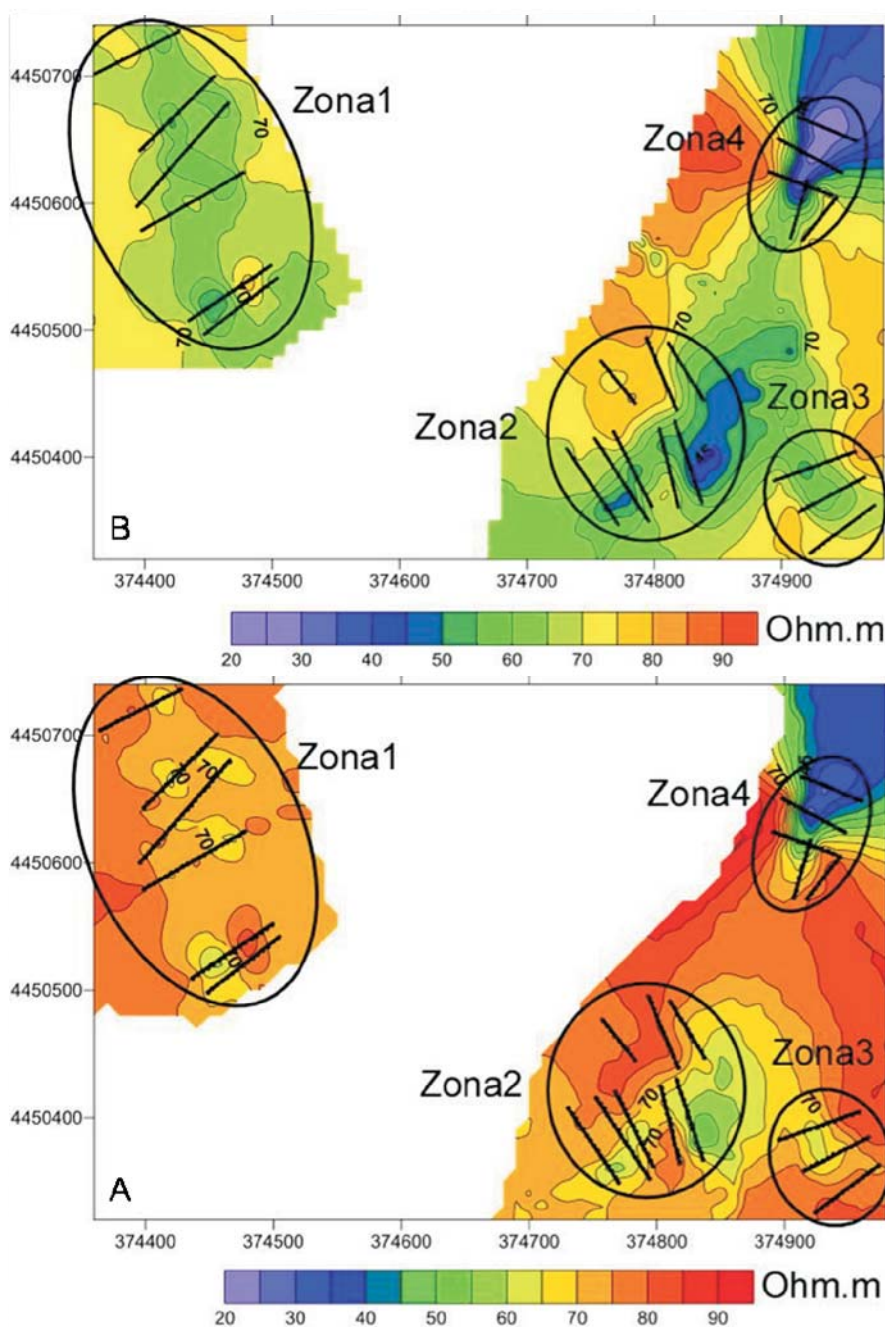


Fig. 3.- Mapas de resistividades aparentes, A) 3 m de profundidad; B) 6 m de profundidad.

Fig. 3.- Apparent resistivity maps, A) 3 m depth; B) 6 m depth.

Las zonas de fractura quedan definidas por bandas más o menos complejas de baja ρ_a ($< 60 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) frente a los granitos frescos ($> 80 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$). En profundidad las ρ_a son más homogéneas, debido a que es menos sensible a la presencia de suelo y/o variaciones topográficas superficiales. Por este motivo, para las condiciones de la zona de trabajo, se han utilizado los valores de ρ_a a 6 m de profundidad para caracterizar las zonas de fractura en profundidad.

Desde el punto de vista geológico las zonas de falla más conductoras

son las orientadas según NNE-SSO, seguidas de las NE-SO y NO-SE. Algunas de estas zonas de fractura presentan en planta un carácter anastomosado, propio de fallas de desgarre. Las fracturas de dirección E-O presentan una permeabilidad menor en esta zona del granito, tal y como demuestran sus altos valores de ρ_a . Los trabajos geológicos previos han interpretado estas fracturas como activas en periodos antiguos y no activos bajo el campo de esfuerzos «Alpino» (Eoceno – Actualidad). Desde

el punto de vista estructural las zonas de falla más conductoras se corresponden con las principales fracturas con actividad tectónica terciaria (Muñoz Martín y De Vicente, 1998). Dentro de estas últimas la zona de fractura NNE-SSO, que constituye el límite oriental del granito, es la que presenta una mayor permeabilidad, extensión longitudinal (> 400 m) y anchura (> 20 m).

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por los proyectos PR41/06-14940 (Banco Santander - UCM) y REN2002-04328-

C02-02 / HID (Ministerio de Educación y Ciencia).

Referencias

- Campos, R., Martín-Benavente, C., Pérez del Villar, L., Pardillo, J., Fernández-Díaz, M., Quejido, A., De la Cruz, B. y Rivas, P. (1996). *Geogaceta* 20 (7), 1618-1621.
- Elorza Tenreiro, F.J. (2002). *Proyecto EMESH «Emanometría y simulación estocástica para sistemas hidrogeológicos complejos»*. REN 2002-04328-C02-02. E.T.S.I. Minas y UCM.
- Hidrobap Project, 1999. *Final Open Report, Project no.0703305*. ENRESA-CSN (Eds.). Consejo de Seguridad Nuclear, Madrid, 85 p.
- Mc Neill, J. D. (1980). In *Geonics Limited*, Technical note TN-6.
- Pérez López, R., Paredes, C., Muñoz Martín, A. (2005). *Journal of Structural Geology*, 27, 663 - 677.
- Muñoz Martín, A. y De Vicente, G. (1998). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 11 (1-2), 57-70.
- Pajares Giménez, G. (2005). E.T.S.I. Minas: 90 p.
- Racero, A. (1988). *II Congreso Geológico de España*, Granada.
- Sharma, P.R. (1997). *Environmental and engineering geophysics*. Cambridge University Press 476 p.